



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

**METODIKA MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ TEPLoty ZA
PROUDOVÝM MOTOREM**

METHODOLOGY OF TEMPERATURE MEASUREMENT BEHIND JET ENGINE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Koutný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Matějů

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Martin Koutný**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Matějů**
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Metodika měření rozložení teploty za proudovým motorem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je provést rešerši v oblasti měření teploty, navrhnout metodiku pro měření rozložení teploty za pomocným proudovým motorem kluzáku pro zjištění tepelné zátěže kompozitních částí. Dále provést návrh stendu s ohledem na maximální využití vybavení Leteckého ústavu a minimalizaci nákladů na výrobu. Poté měřicí stend zrealizovat, ověřit jeho funkčnost a bude-li to možné, provést měření teploty za proudovým motorem.

Cíle bakalářské práce:

1. Rešerše v oblasti měření teploty.
2. Návrh metodiky pro měření teploty za proudovým motorem kluzáku.
3. Návrh stendu.
4. Volitelně měření teploty za motorem.

Seznam doporučené literatury:

KREIDL, M.: Měření teploty: senzory a měřicí obvody. Praha: BEN, 2005, 239 s. ISBN 80-7300-145-4.
MIKYŠKA, L.: Termoelektrické články. Praha: SNTL, 1964, 152 s.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato práce se zabývá měřením rozložení teploty za proudovým motorem. V rešeršní části jsou uvedeny vybrané způsoby měření teploty. Praktická část je pak rozdělena na návrh (a poté i montáž) měřicího stendu, metodiku měření a samotné měření. Hlavním výstupem jsou teplotní mapy získané měřením teplot za proudovým motorem TJ – 42.

Klíčová slova

Teplota, termočlánek, měření, teplotní mapa, stend, proudový motor

Abstract

This thesis is focused on temperature measurement behind jet engine. The theoretical part introduces chosen ways of temperature measurement. The practical part is divided into design (and later assembly) of the measuring stand, methodology of measurement and the measurement itself. The main outcome are heat maps gained by measuring temperatures behind TJ – 42 jet engine.

Keywords

Temperature, thermocouple, measurement, heat map, stand, jet engine

Bibliografická citace

KOUTNÝ, M. *Metodika měření rozložení teploty za proudovým motorem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 17 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Matějů.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Metodika měření rozložení teploty za proudovým motorem vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu použité literatury.

V Brně dne 25.5.2018

.....
Martin Koutný

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jiřímu Matějů za cenné rady a vstřícný přístup, a také své rodině za podporu a inspiraci při tvorbě této práce.

Obsah

1. Úvod	2
2. Rešerše v oblasti měření teploty	2
2.1 Teplota jako fyzikální veličina	3
2.2 Vybrané způsoby měření teploty	3
2.2.1 Bimetalový teploměr	3
2.2.2 Kapalinový teploměr	4
2.2.3 Termočlánek	5
2.2.4 Termovize	6
2.2.5 Odporové senzory teploty	7
3. Konstrukce standu	8
3.1 Požadavky	8
3.2 Provedení	8
3.3 Zhodnocení funkce standu	10
4. Metodika měření	11
4.1 Motivace	11
4.2 Technická data motoru	11
4.3 Výběr způsobu měření	11
4.4 Podmínky měření	12
4.5 Postup měření	13
5. Měření	14
5.1 Vzdálenost 1,3 metru	15
5.2 Vzdálenost 2 metry	15
5.3 Vzdálenost 3 metry	16
6. Závěr	17
7. Zdroje informací	19

1. Úvod

Kluzák je obvykle jedno až dvoumístné letadlo bez vlastního pohonu. Do potřebné výšky je vyneseno pomocí tažného letadla nebo katapultem. Vytrvalost poté závisí na více faktorech, zejména na schopnostech pilota, povětrnostních podmínkách a aerodynamickém řešení kluzáku. Může se ale stát, že kvůli (někdy i drobné) chybě pilota nebo rychlou změnou povětrnostních podmínek dojde k situaci, ve které klouzavost kluzáku nemusí stačit na bezpečný návrat na letiště.

V posledních letech se proto objevují kluzáky vybavené pomocným pohonem (malý vrtulový nebo proudový motor), který může být v případě nutnosti spuštěn, což umožní bezpečný návrat na letiště. Nicméně kromě pozitivního vlivu ve formě zvýšení doletu může mít přítomnost pohonu v kluzáku i negativní dopady – ať už jde o vliv na samotnou konstrukci kluzáku, nutnost nést palivo nebo možný přenos vibrací z motoru na ostatní části trupu.

Tyto jevy musí být dobře teoreticky zmapovány a i výsledný kluzák musí být navržen tak, aby od těchto vlivů nehrozilo žádné nebezpečí. Poté je nutné reálný kluzák nebo jeho části otestovat.

Právě testováním částí kluzáku se tato bakalářská práce zabývá. Konkrétně se jedná o měření teplot a vytvoření teplotní mapy za motorem TJ-42, aby se ověřilo, že při jeho použití na kluzáku HpH 304 Shark Jet nezpůsobí motor zahřátí ocasních ploch nad povolenou teplotu.

2. Rešerše v oblasti měření teploty

2.1 Teplota jako fyzikální veličina

Teplota je jednou ze základních fyzikálních veličin. Její základní jednotkou je Kelvin (K), nicméně v technické praxi se používají i další jednotky, např. stupeň Celsia (°C) nebo stupeň Fahrenheita (°F). Termodynamická teplotní stupnice začíná na teplotě 0 K (-273,15 °C), což je teplota, kdy ustává pohyb částic.

Teplotu není možné měřit přímo, ale na látkách se projevuje (resp. se projevují její změny) několika způsoby, což umožňuje její nepřímé měření. První z těchto způsobů využívá fakt, že je teplota stavová veličina je tedy možné ji určit ze stavové rovnice:

$$\frac{p \cdot V}{T} = konst.$$

Jeden z možných tvarů stavové rovnice, kde p je tlak, V objem a T teplota.

Je třeba dodat, že stavová rovnice se využívá spíše při výpočtech, než při měření, a že platí pouze pro ideální plyny.

Dále se teplota projevuje při teplotní roztažnosti, kdy zvýšením teploty tělesa dojde ke zvětšení jeho rozměrů. Tento jev se využívá u dilatačních teploměrů (bimetalové, kapalinové,...). Teplotní roztažnost může být nebezpečná, protože v závislosti na konkrétním materiálu může i malá změna teploty způsobit velké změny rozměrů a je proto potřeba brát tento jev v úvahu při návrhu konstrukcí.

Kromě mechanických vlastností ovlivňuje teplota i elektrické vlastnosti materiálů. Asi nejznámějším jevem je rostoucí odpor kovů s rostoucí teplotou a naopak při absolutní nule by měly být kovy supravodivé.

Méně známý, ale o to více používaný je pak Seebeckův (nebo také termoelektrický) jev. Ten se využívá např. u termočlánků.

Měření lze dělit na dotykové a bezdotykové. U dotykového měření je nutný přímý kontakt měřicího zařízení s tělesem, jehož teplota je měřena (jde např. o termočlánky, dilatační teploměry, krystalové teploměry, atd.), zatímco bezdotykové měření umožňuje měřit teplotu objektu z větší vzdálenosti (termokamery, pyrometry).[1][2]

2.2 Vybrané způsoby měření teploty

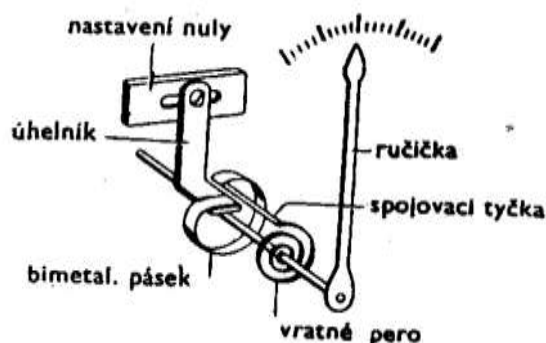
2.2.1 Bimetalový teploměr

Bimetalové teploměry patří mezi dilatační teploměry. Fungují na principu rozdílné teplotní roztažnosti dvou kovových materiálů (odtud „bimetalový“). Ta je dána koeficientem teplotní roztažnosti α těchto kovů. Obvykle se pro výrobu bimetalových teploměrů používají kovy s $\alpha = (1,7 \div 24) \cdot 10^{-6} K^{-1}$. Nepřesnost měření se pohybuje od $\pm 1 \%$ do $\pm 5 \%$.

Existuje několik konstrukcí bimetalových teploměrů. Jde např. spirálový, šroubovitý nebo diskový.[2]



Obr. 1 Bimetalový teploměr [3]



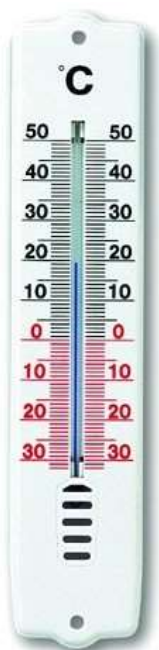
Obr. 2 Princip činnosti bimetalového teploměru [4]

2.2.2 Kapalinový teploměr

Kapalinové teploměry jsou dilatační teploměry využívající teplotní roztažnosti kapaliny. Obvykle se skládá ze skleněné nádoby (obsahující kapalinu), na kterou navazuje vakuová kapilára, vedle které se nachází stupnice. Tato sestava je pak vsazena do skleněného obalu.

Nejběžnější měřicí kapalinou je rtuť, dále se používá alkohol, případně toluen. Při překročení maximální teploty teploměru hrozí jeho roztržení, proto je důležité pro měření vybrat teploměr se správnou teploměrovou kapalinou. Některé teploměry mají nad koncem stupnice rozšířenou kapiláru, která chrání teploměr před roztržením při přehřátí.

Rozsah měřitelných teplot závisí zejména na teploměrové kapalině, celkově se však jedná od -190 do 600 °C, a v případě rtuti jde o -38 až 350 °C, pokud je v kapiláře vakuum, v případě plnění dusíkem může být horní hranice až 600 °C. Nejlepší kapalinové teploměry pracují s přesností $\pm 0,1$ °C. [2]



Obr. 3 Kapalinový teploměr[5]



Obr. 4 Laboratorní teploměr [6]

2.2.3 Termočlánek

Termočláanky se používají k dotykovému měření teploty. Jejich funkce je založena na Seebeckově jevu (také bývá označován jako termoelektrický jev). Tento jev spočívá ve vzniku elektrického napětí mezi konci vodiče o různých teplotách.

Z konstrukčního hlediska jsou termočláanky tvořeny dvěma kabely z různých kovů (nebo slitin), které jsou na jednom konci spojené

Přesnost a rozsah měřitelných teplot závisí na kombinaci použitých kovů. Těch existuje velké množství. Některé termočláanky se pak vyrábí ve dvou třídách přesnosti, viz obr. 5 a tab.1. [2][7]



Obr. 5 termomočlánek typu K [8]



Obr. 6 plášťový termočlánek [9]

Ty- pe	Rozsah	Třída 1	Rozsah	Třída 2	Rozsah	Třída 3
K	-40...1000°C	±1,5°C tj. 0,004*(t)	-40...1200°C	±2,5°C tj. 0,0075*(t)	-200...40°C	±2,5°C or 0,0015*(t)
J	-40...750°C	±1,5°C tj. 0,004*(t)	-40...750°C	±2,5°C tj. 0,0075*(t)	-----	
S/R	0...1600°C	±1,0°C tj. 1,0+0,003(t-1100)°C	0...1600°C	±1,5°C tj. 0,0025*(t)	-----	
B	-----		600...1700°C	±1,5°C tj. 0,0025*(t)	600...1700°C	4°C tj. 0,005*(t)
N	-40...1000°C	±1,5°C tj. 0,004*(t)	-40...1200°C	±2,5°C tj. 0,0075*(t)	-200...40°C	±2,5°C tj. 0,0015*(t)
T	-40...350°C	±0,5°C tj. 0,004*(t)	-40...350°C	±1,0°C tj. 0,0075*(t)	-200...40°C	±1,0°C tj. 0,0015*(t)
E	-40...800°C	±1,5°C tj. 0,004*(t)	-40...900°C	±2,5°C tj. 0,0075*(t)	-200...40°C	±2,5°C tj. 0,0015*(t)

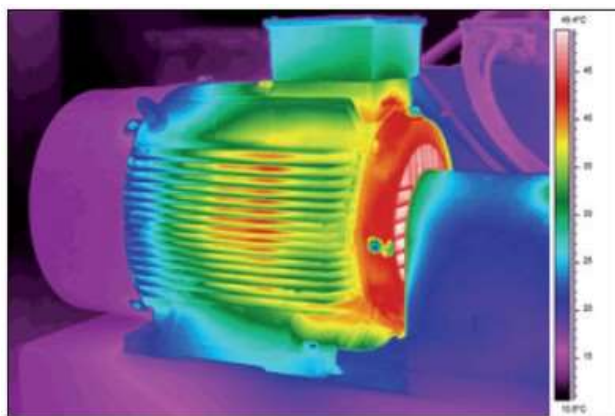
Obr. 7 Třídy přesnosti některých termočláanků [7]

Tab. 1 přehled typů termočlánků [10]

Typ	Měřicí rozsah [°C]	Kombinace materiálů	Použití
B	0-1700	Pt, 30%Rh - Pt, 6%Rh	pro měření vyšších teplot, nevyžaduje kompenzační vedení
C	0-2300	W, 5%Re - W, 26%Re	pro měření vysokých teplot, křehký
D	0-2300	W, 3%Re - W, 25%Re	pro měření vysokých teplot, křehký
E	-200-950	Ni, 10%Cr - Cu, 45% Ni	všeobecné použití, pro měření středních a nižších teplot
G	0-2300	W - W, 26%Re	pro měření vysokých teplot, křehký
J*	-210-1200	Fe - Cu, 45%Ni	pro měření vyšších teplot v redukční atmosféře
K*	-200-1250	Ni, 10%Cr - Ni, 2%Al, 2%Mn, 1%Si	všeobecné použití v oxidační atmosféře
L	0-900	Fe - Cu, 45% Ni	zastaralý typ, nepoužívá se
M	-50-1410	Ni - Ni, 18%Mo	
N*	-270-1300	Ni, 14%Cr, 1,5%Si - Ni, 4,5%Si, 0,1%Mg	nový typ, náhrady typu K
P	0-1395	Platinel - Platinel	stabilnější, ale dražší než typy K a L
R	-50-1750	Pt, 13%Rh - Pt	velmi přesný, pro vyšší teploty
S	-50-1750	Pt, 10%Rh - Pt	velmi přesný, pro vyšší teploty
T*	-270-400	Cu - Cu, 45%Ni	všeobecné použití pro nižší teploty, odolný vlhkosti
U	0-600	Cu-Cu, 45%Ni	zastaralý typ, podobný typu T, nepoužívá se

2.2.4 Termovize

Termovize je jeden ze způsobů bezkontaktního měření teploty. Využívá tepelného záření, které vydává každé těleso o teplotě vyšší, než je absolutní nula. Toto záření je pak převedeno na obraz, na kterém jsou barevně odlišeny oblasti různých teplot. Přesnost termokamer bývá 0,1°C. [3][11]



Obr. 8 Výstup z termovize [13]

2.2.5 Odporové senzory teploty

Odporové kovové teploměry využívají změny odporu kovů v závislosti na teplotě. Mezi nejběžnější typy patří platinové snímače teploty. Ty mají rozsah -20 až 850 °C. Dále existují niklové a měděné odporové snímače teploty.

Kromě kovových odporových teploměrů existují i polovodičové odporové snímače teploty (termistory, negistory, pozistory), které využívají stejné zákonitosti jako kovové. [2]



Obr. 9 Odporový senzor teploty PT100 [14]

Podobně jako termočláanky mají i odporové teploměry dvě třídy přesnosti. Závislost přesnosti na teplotě senzoru PT100 dle DIN EN 60751 je uvedena v tab. 2.[17]

Tab. 2 Závislost přesnosti na teplotě odporového senzoru teploty PT100 [17]

	Třída A	Třída B
max. odchylka při 0°C	± 0,15 °C	± 0,3 °C
max. odchylka při 200°C	± 0,55°C	± 1,3 °C
max. odchylka při 400°C	± 0,95 °C	± 2,3 °C
max. odchylka při 600°C	± 1,35 °C	± 3,3 °C

3. Konstrukce stendu

3.1 Požadavky

Na měřicím stendu budou upevněny teplotní senzory a ten tedy bude přímo v proudu horkých spalin vystupujících z motoru. Stend musí tyto teploty (přes 200 °C) snést po dlouhou dobu a musí mít dostatečnou tuhost, aby nebyl poškozen vibracemi od proudu spalin, případně aby nedocházelo k velkým výchylkám teplotní senzory.

Senzory teploty se musí pohybovat v rovině kolmé na osu motoru alespoň 250 mm na každou stranu od této osy a posuv je nutné odměřovat. Tento pohyb bude ovládán manuálně, takže jakékoli ovládací prvky stendu se musí nacházet v bezpečné vzdálenosti od proudu spalin, tzn. nejméně 1 m. Zároveň musí být chráněny před teplem sálajícím ze zahřátých částí stendu, aby nedošlo k ovlivnění a tím i znehodnocení naměřených dat.

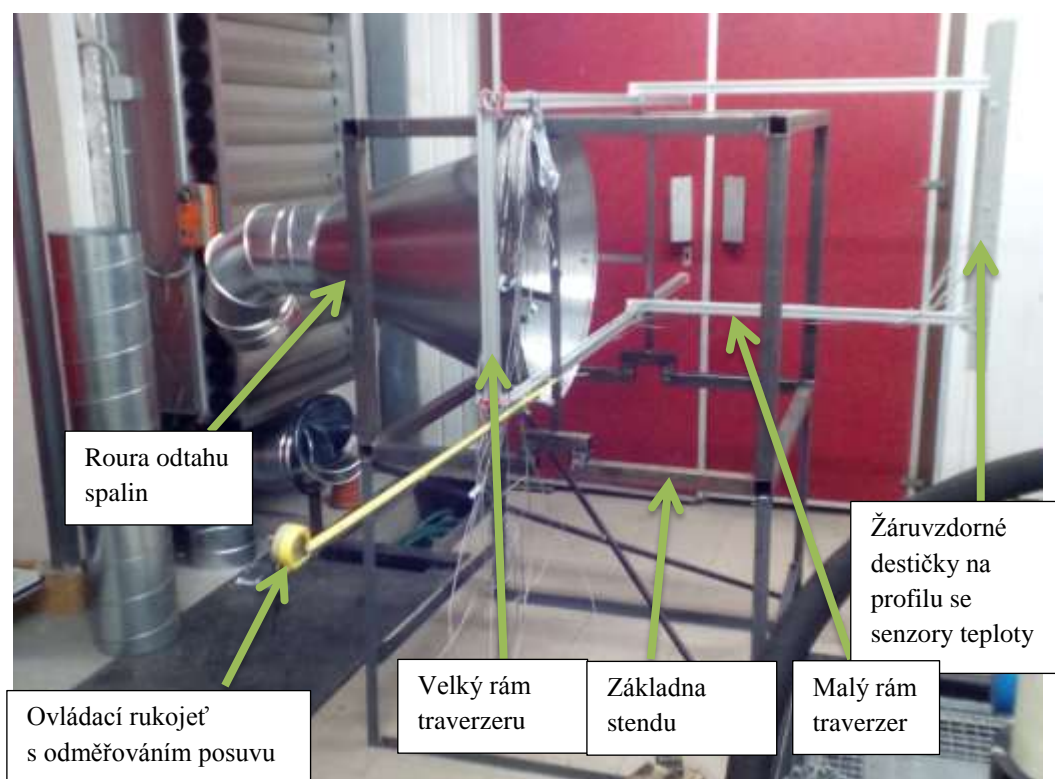
3.2 Provedení

Finální podoba stendu se skládá ze základny, tj. z konstrukce svařené z ocelových profilů, a traverzeru smontovaného ze stavebnicových profilů Alutec.

Základna pochází z inventáře Leteckého ústavu a je svařena z ocelových jáckelů o rozměrech 45×45×3 mm. Její celkové rozměry jsou 1000×800×1000 mm. Ještě před začátkem měření se ukázalo, že je základna příliš nízká, což bylo vyřešeno přivařením dalších profilů na její spodní stranu, což zvětšilo výšku o 760 mm. V průběhu měření se základna nebude nijak pohybovat, mj. protože je k ní připevněna roura odtahu spalin.

Traverzer je pohyblivá část stendu. Skládá se ze dvou obdélníkových ráků, které jsou smontovány ze stavebnicových profilů Alutec 30×30 mm. Větší rám o rozměrech 1900×635 mm je pomocí na míru vyrobených čepů posuvně uložen na základně. Toto uložení umožňuje posuv traverzeru v jednom směru (směr kolmý k ose motoru) a zároveň je zaručuje dostatečnou tuhost celé sestavy. Stykové plochy jsou mazány grafitovým sprejem. Na větším ráku je také přišroubována ovládací rukojeť o délce 1040 mm. Mezi koncem rukojeti a základnou je umístěn metr, který slouží k odměřování vzdálenosti posuvu.

Menší rám traverzeru o rozměrech 980×635 mm se skládá ze dvou vodorovných a jednoho svislého profilu a je pomocí úhelníků napevno namontován na větším ráku a přečnává přes půdorys základny směrem k motoru. Díky tomu nejsou termočlánky ovlivněny sáláním tepla z různých částí stendu. Na svislém profilu jsou namontovány termočlánky, které jsou chráněny před sáláním tepla z tohoto profilu pomocí žáruvzdorných destiček.



Obr. 10 Stend



Obr. 11 detail uložení senzorů teploty

3.3 Zhodnocení funkce stendu

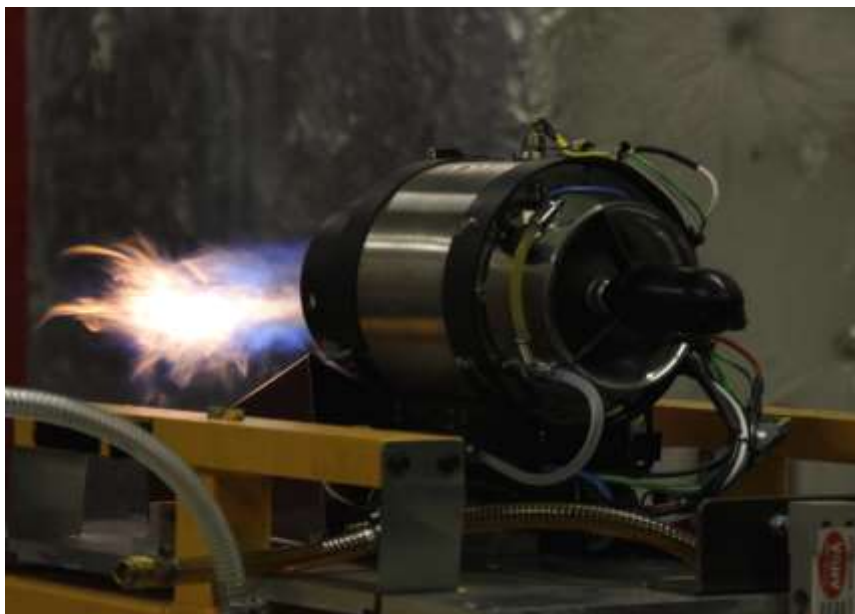
Na začátku měření se stend ukázal jako nedostatečně tuhý a bylo nutné přidat šikmé vzpěry mezi velký a malý rám traverzeru, nicméně po těchto úpravách se žádné další problémy s tuhostí neprojevili. Posuvné uložení traverzeru umožňovalo jeho plynulý a relativně přesný pohyb (ačkoli zde musela obsluha nejprve získat určitou praxi). Použití stavebnicových profilů také umožňovalo vést kabeláž termočlánků drážkami, a nebyla tak vystavena vlivům proudu spalin. Kladně lze tak hodnotit to, že i při delším vystavení vysokým teplotám (během delších měření) nebylo fungování stendu nijak omezeno.

Naopak mezi zápory stendu patří nemožnost posuvu traverzeru ve svislém směru, což nebylo vzhledem k dostupnému materiálu možné zajistit. Tento nedostatek nebylo možné eliminovat ani přidáním dalších senzorů, protože použitá sběrnice dat umožňovala připojení maximálně devíti vstupů (viz kapitola 4).

4. Metodika měření

4.1 Motivace

Měřit se bude teplota za motorem TJ-42, který slouží jako pomocná pohonná jednotka na kluzáku HpH 304 SHARK JET. Důvodem měření je nutnost ověřit, že části trupu (zejména svislá ocasní plocha) kluzáku nebudou vystaveny teplotám nad 80 °C, při nichž kompozit, ze kterého je kluzák vyroben začíná ztrácet mechanické vlastnosti.



Obr. 12: Spouštění motoru TJ-42

4.2 Technická data motoru

Tab. 3 základní data o motoru [15]

Výrobce	M+D Flugzeugbau GmbH
Maximální tah	420N
Nominální tah	400 N
Maximální otáčky	97 000 min ⁻¹
Největší průměr	156 mm
Délka	320 mm
Hmotnost samotného motoru	4 kg
Palivo	Jet A-1

4.3 Výběr způsobu měření

V první kapitole jsou uvedeny způsoby měření teploty (typy teploměrů), které by byly schopny měřit teploty za proudovým motorem. Jedním z požadavků na senzory teploty v tomto měření je možnost digitálního záznamu měření (stát v proudu spalin z motoru a každou sekundu zapisovat stále se měnící teploty z několika dilatačních teploměrů není praktické, bezpečné ani reálné). Tento požadavek splňují pouze termočlánky, termokamera a odporové senzory teploty.

Dalším požadavkem je dostupnost na Leteckém ústavu, což splňují všechny zbylé způsoby měření, nicméně odporové senzory teploty se nevyskytují v dostatečném počtu.

V případě měření termokamerou je nutná její složitá a zdlouhavá kalibrace, zatímco u termočlánků tato potřeba odpadá, resp. je kalibrace mnohem jednodušší. Jako nejvhodnější způsob měření teploty pro tento případ byly tedy zvoleny termočlánky.

4.4 Podmínky měření

Měření bude probíhat ve vzdálenostech 1,3 m, 2 m a 3 metry od výstupní trysky motoru. Plánovaná nejmenší vzdálenost měla být 0,5 metr, ale až v průběhu prvních měření se ukázalo, že vzhledem ke geometrii stendu dochází k nerovnoměrnému odvodu spalín a kvůli kyvnému uložení motoru způsobuje jeho nebezpečné rozkmitání.

Použito bude devět termočlánků typu K II. třídy přesnosti (rozsah $-200 \div 1200 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Budou uspořádány svisle a velikost roztečí mezi nimi byla zvolena 30 mm. Seskupeny budou tak, aby se prostřední termočlánek nacházel ve výšce geometrické osy motoru. Ke sběru dat bude použit datalogger ALMEMO® 2890-9 s možností sběru dat z maximálně devíti termočlánků. Frekvence záznamu bude nastavena na 1 s. [7]



Obr. 13 Datalogger ALMEMO® 2890-9 [11]

Krok posuvu traverzeru a celkový rozsah měření bude záležet na délce daného měření, nicméně je třeba vzít v úvahu, že čím menší bude krok posuvu, tím přesnější bude teplotní mapa, a také to, že v čím větší vzdálenosti se bude měřit, tím širší bude kužel spalín; je tedy třeba zvolit větší rozsah posuvu, aby bylo maximální množství naměřených hodnot.

Řízení motoru je naprogramováno tak, aby motor běžel v přibližně čtyřminutových předem definovaných cyklech, které představují různé provozní režimy motoru.

Během celého měření musí mít všechny osoby v blízkosti motoru ochranu sluchu, a pokud se budou pohybovat v místnosti s motorem, tak i ochranu dýchacích cest. Přestože je v této místnosti výkonný odtah, není možné zaručit stoprocentní odvod spalín, což by mohlo, obzvláště při delších měřeních, vést ke zvyšování koncentrace spalín nad bezpečnou úroveň.

4.5 Postup měření

Na začátku měření bude traverzer v maximální vzdálenosti od osy motoru a budou spuštěna všechna potřebná záznamová zařízení (datalogger a kamery). Poté dojde ke spuštění motoru dle pokynů výrobce.

Po náběhu motoru ihned začíná první cyklus. Po jeho dokončení musí vzhledem k manuálnímu ovládání traverzeru přijít obsluha ke stendu a přestavit jej do nové pozice. Toto musí proběhnout dostatečně rychle (řádově sekundy), protože mezi cykly motoru je jen krátká prodleva a také proto, že se obsluha traverzeru bude pohybovat v místnosti s motorem, kde bude nadměrná úroveň hluku a zvýšená koncentrace spalin. Pobyt v této místnosti je tedy během měření nutné omezit pouze na nezbytné minimum, jinak by hrozilo poškození zdraví.

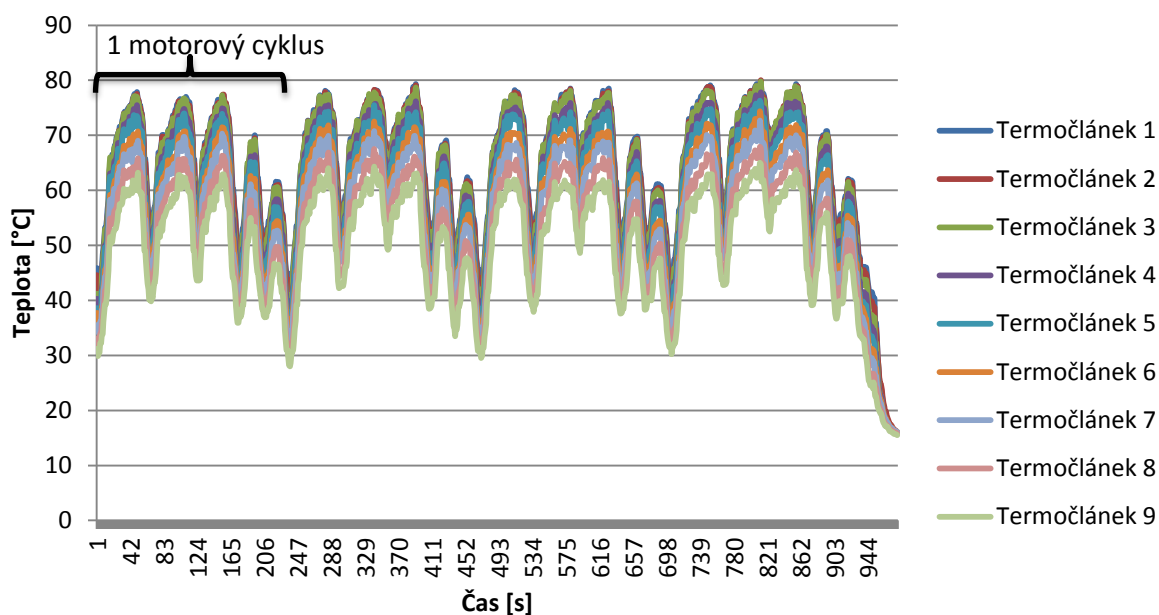
Takto bude probíhat i zbytek měření, dokud neuplyne přednastavená doba, po kterou má motor běžet. Poté je, opět dle pokynů výrobce, nutné motor vypnout a dochladit až na výrobcem určenou teplotu. Následně je možné vypnout datalogger a kamery a naměřená data vyhodnocovat a vytvořit teplotní mapy.

5. Měření

Ve druhé polovině října 2017 proběhla celkem čtyři měření teploty za motorem. Jednalo se o jedno měření v každé ze vzdáleností 1,3 m a 2 m. Ve vzdálenosti 3 metry proběhla měření dvě. Měření ve vzdálenosti 1,3 m trvalo přibližně hodinu (15 motorových cyklů), ve vzdálenosti 2 m přibližně tři hodiny (45 motorových cyklů) a ve vzdálenosti 3 m celkem čtyři hodiny (60 motorových cyklů). Původní záměr byl provést několik dalších měření (konkrétně ve vzdálenostech 0,5 m, 1 m případně i 0,7 m), nicméně to z hygienických důvodů nebylo možné. Získaná data jsou však dostatečná pro vyvození smysluplných závěrů.

Výstupem z dataloggeru byl textový dokument obsahující všechna data z daného měření. Vzhledem k tomu, že při některých měřeních nebyly všechny pozice měřeny ve správném pořadí, bylo třeba je před vytvořením teplotních map seřadit. K tomu bylo potřeba data z textového dokumentu převést do MS Excel. Vyhodnocení pokračovalo v softwaru MATLAB, kde byly vytvořeny teplotní mapy.

Během seřazování hodnot se ukázalo, že je vhodné z naměřených dat vytvořit graf závislosti teploty na čase od začátku měření (a tedy i na poloze termočlánků a výkonu motoru), kde jsou dobře patrné jednotlivé cykly motoru i jejich části. Viz obr. 14.

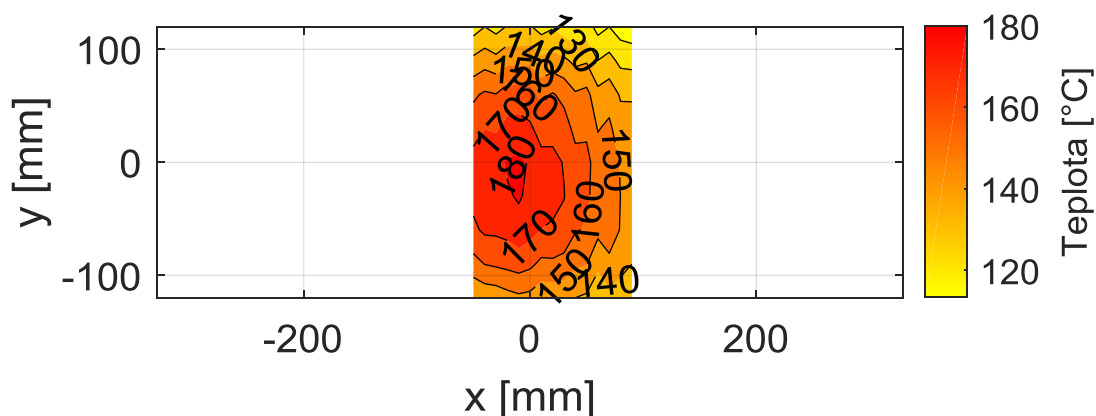


Obr. 14 ukázka grafické závislosti teploty na čase a výkonu motoru

5.1 Vzdálenost 1,3 metru

V této vzdálenosti probíhalo první měření, kdy se obsluha seznamovala s chováním stendu a dalších částí vybavení během měření. Nicméně vše proběhlo dle navržených postupů a naměřená data jsou platná.

Maximální teplota byla 181,6 °C. Rozsah posuvu traverzeru byl 50 mm na jednu, resp. 90 mm na druhou stranu od osy (celkem tedy 140 mm). Atmosférický při měření byl 987 hPa a teplota 15 °C.

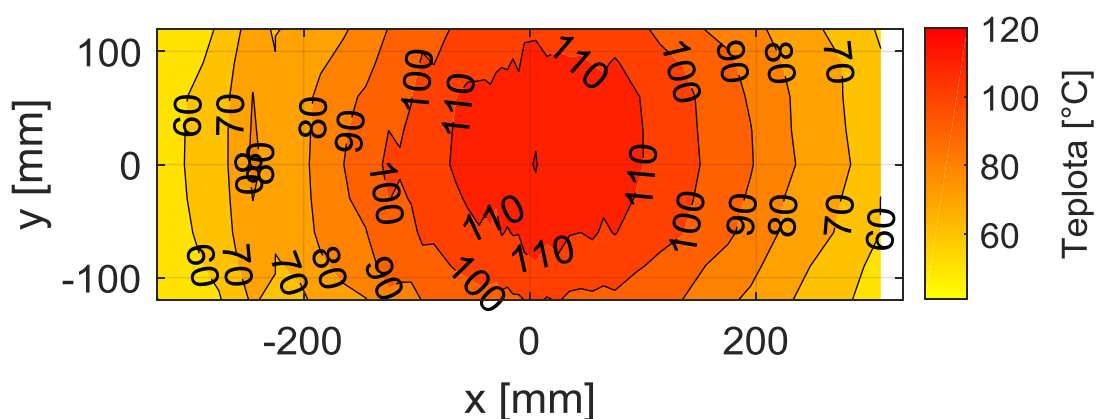


Obr. 15 teplotní mapa ve vzdálenosti 1,3 metru za tryskou motoru

5.2 Vzdálenost 2 metry

Toto měření v délce 3 hodiny (45 cyklů) probíhalo těsně po měření ve vzdálenosti 3 metry, které trvalo 4 hodiny. Stend a další části měřicí aparatury byly tedy téměř nepřetržitě „v záběru“ 7 hodin, což byla dobrá možnost otestovat, zda všechny části fungují správně.

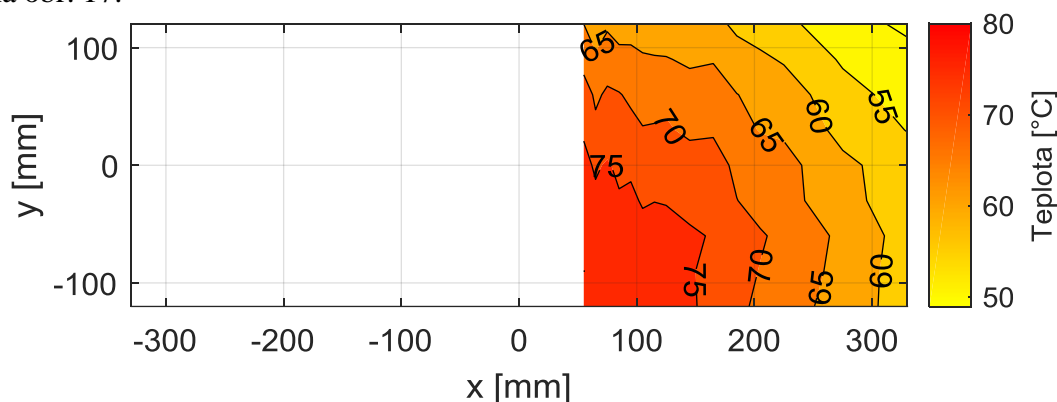
Rozsah měření byl od -375 do 310 mm od geometrické osy motoru. Maximální teplota v této vzdálenosti je 120,5 °C a byla naměřena mírně vpravo od osy. Atmosférický při měření byl 985 hPa a teplota 16 °C.



Obr. 16 Teplotní mapa ve vzdálenosti 2 metry za tryskou motoru

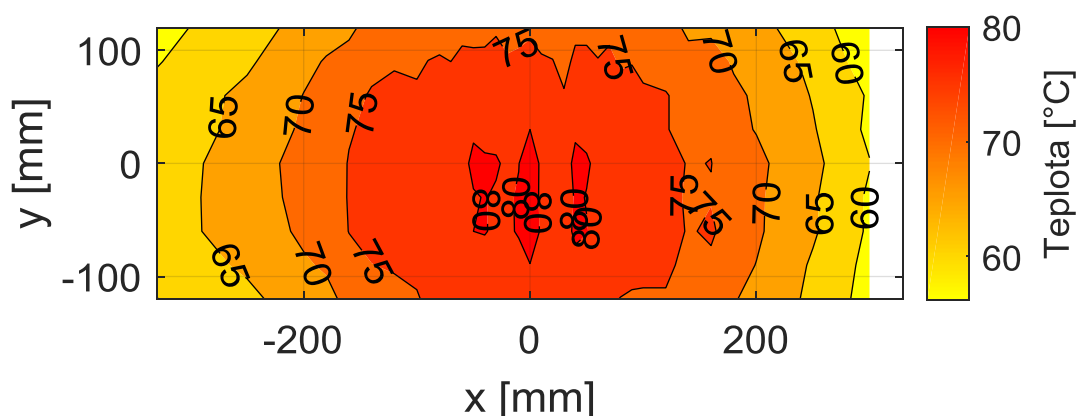
5.3 Vzdálenost 3 metry

Při prvním měření ve vzdálenosti 3 metry od výstupní trysky byl motor po předchozím přestavování umístěn nesprávně, v důsledku čehož byla tryska vyosena mírně dolů. Tento problém byl ale včas objeven a měření bylo po 15 cyklech předčasně přerušeno. Výstup z něj je na obr. 17.



Obr. 17 Měření ve vzdálenosti 3 metry s vyosenou tryskou

Po vyrovnaní motoru začalo nové měření v délce 45 cyklů (3 hodiny), které probíhalo bez problémů, viz teplotní mapa na obr. 18. Obě tato měření probíhala za atmosférického tlaku 987 hPa a teplotě 16 °C.



Obr. 18: Teplotní mapa ve vzdálenosti 3 metry od výstupní trysky

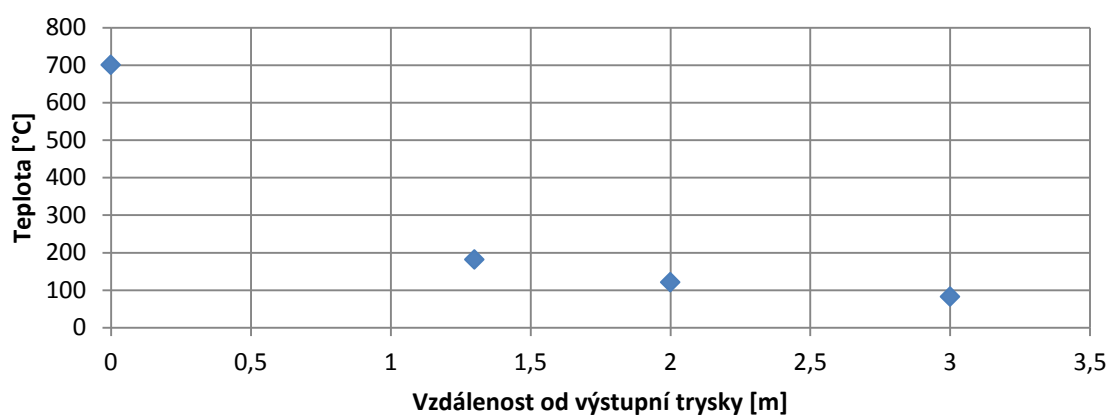
Maximální naměřená teplota byla 82,5 °C a to v ose a ve dvou oblastech přibližně symetrických okolo osy motoru. Tento částečný rozpad teplotního pole může být způsoben velkou vzdáleností od motoru, kde již proud spalín ztrácí celistvost a může být narušen zdánlivě nepodstatnými jevy (průvan způsobený otevřením dveří od místnosti s motorem). Druhé možné vysvětlení spočívá v samotné tvorbě teplotní mapy, protože při ní byly použity pouze maximální teploty z každého termočlánku a každé pozice, avšak bez ohledu na čas.

Původně bylo v plánu provést další měření ve vzdálenosti 0,7 metru za motorem, ale vzhledem ke dříve zmiňované interakci proudu spalín se stendem a tím způsobenými vibracemi motoru by bylo možné měření provést pouze při použití jednoho termočlánku na tenké tyči, kterým by se tento efekt minimalizoval. Nicméně vzhledem k nízké efektivitě, velké časové náročnosti a zejména kvůli nutnosti předčasně přerušit teplotní měření z hygienických důvodů takové měření neproběhlo.

5.4 Závislost teploty na vzdálenosti od výstupní trysky

Z naměřených hodnot byla určena závislost teploty na vzdálenosti od výstupní trysky (viz obr. 19). Na prvním intervalu (mezi vzdáleností 0 a 1,3 metru od trysky) je patrný prudký pokles oproti ostatním hodnotám. Bylo by zajímavé určit funkci této závislosti, nicméně by bylo třeba naměřit více dat, což naneštěstí z důvodu nemožnosti pokračovat v měření nebylo možné.

Závislost teploty na vzdálenosti od výstupní trysky



Obr. 19 Závislost teploty na vzdálenosti od výstupní trysky

6. Závěr

V první části práce se nachází rešerše o vhodných způsobech měření teplot za proudovým motorem.

Druhá část je věnována požadavkům na měřicí stend a jeho návrhu. Ten byl skutečně sestaven a použit během měření, takže na konci této části se nachází stručné zhodnocení jeho funkčnosti.

Ve třetí části se nachází metodika měření a je zde rozebírán postup měření, podmínky měření (tzn. vybavení a informace o důležitých vzdálenostech) a výběr nejvhodnějšího způsobu měření teploty. Z měření, které probíhalo dle této metodiky, byly získány platné výstupy a ta tedy může být prohlášena za funkční.

Poslední, čtvrtá část je věnována samotnému měření. Hlavním výstupem je zde teplota ve vzdálenosti 3 metry od motoru, tj. v úrovni ocasních ploch kluzáku. Maximální teplota naměřená v této úrovni byla 82,5 °C, což je vyšší než povolená teplota. Nicméně na zemi je povoleno spouštět motor po dobu maximálně jedné minuty při tahu 50 % nebo maximálně na 5 sekund při maximálním tahu. Zároveň nejvyšší teplota naměřená při letových zkouškách byla 65 °C. Důvodem tohoto rozdílu je pravděpodobně to, že za letu dochází k odvodu tepla prouděním vzduchu okolo ocasních ploch a také samotná přítomnost ocasních, kdy je teplo odváděno z ohříváných částí na ostatní části o nižší teplotě, což při zkouškách samotného motoru není možné nasimulovat.

Vzhledem k tomu, že výstupy z měření jsou platné, je metodika jakožto jeden z hlavních úkolů práce splněn. Stend i metodika by tedy po drobných změnách (v závislosti na konkrétním případě) byly použitelné i pro měření teploty za jinými motory z kategorie modelářských nebo malých leteckých motorů.

7. Zdroje informací

[1] HALLIDAY, David, Robert RESNICK, Jearl WALKER a Petr DUB. *Fyzika. Svazek 1. 2. přeprac. vyd.* Brno: VUTIUM, 2013, 1 sv. 576 s : obr., barev. fot., grafy. ISBN 978-80-214-4123-1

[2] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. Praha: BEN, 2005, 239 s. ISBN 80-7300-145-4

[3] *MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE* [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://www.e-pristroje.cz/pictures/teplomery/t329-01.jpg>

[4] *PALBA.CZ: Přístroje pro sledování chodu leteckých motorů* [online]. 2009-04-09 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://www.palba.cz/forumfoto/albums/userpics/12062/pristroje50.jpg>

[5] *MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE* [online]. [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://www.e-pristroje.cz/pictures/teplomery/t311.jpg>

[6] *RS Components* [online]. [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: https://media.rs-online.com/t_large/F4663352-01.jpg

[7] Třídy přesnosti pro termočlávkové snímače teploty. *Günther temperaturmesstechnik* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.guenther.eu/d713b8f0-54e7-2c04-e4d1-179b215fcc36?Edition=cz>

[8] Thermocouple K. *Wikipedia: Thermocouple K* [online]. 2009-04-12 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: [https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Thermocouple_K_\(2\).jpg](https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Thermocouple_K_(2).jpg)

[9] *HTH8: Plášťové termočlánky* [online]. [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://hth8.cz/cs/71-teplotni-cidla/72-termoclaniky-72/60-plastovetermoclaniky.htm>

[10] Stavba termočlávků, jejich účinnost a využití. *E - Konstrukter: Termočlánky: konstrukce, využití a účinnost* [online]. 2014, 2014-07-05 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/termoclaniky-konstrukce-vyuziti-a-ucinnost>

[11] LYSENKO, Vladimír. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 153 s. : il. ISBN 80-7300-180-2.

[12] *NaPosed.cz* [online]. [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://www.naposed.cz/cs/content/33-jak-funguje-termovize>

[13] SMETANA, Ing. Jaroslav. *ELEKTRO: Časopis pro elektrotechniku* [online]. 2016 [cit. 2018-05-24]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/clanek/mereni-pri-udrzbe-pohonu-a-motoru-10-cast-jak-a-kde-pomuze-termovize-pri-udrzbe-pohonu-a-motoru-2112>

[14] *RS Components* [online]. [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: https://media.rs-online.com/t_large/F2364261-01.jpg

[15] HpH sailplanes. *Technical Description, Operating, Maintenance and Repair manual: Glasflügel 304 S*. 2010., 45 s

[16] Ahlborn [online]. [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.ahlborn.com/pictures/2890-1-661.png>

[17] Technické informace: Odporový snímač teploty. *Günther temperaturmesstechnik* [online]. [cit. 2018-05-25]. Dostupné z: <https://www.guenther.eu/4536c52d-b385-9092-115b-4abc4ed55ba5?Edition=cz>